

## EXPRESS MAIL CERTIFICATE

1/25/02

Date

Label No.

I hereby certify that, on the date indicated above, this paper or fee was deposited with the U.S. Postal Service & that it was addressed for delivery to the Assistant Commissioner for Patents, Washington, DC 20231 by "Express Mail Post Office to Addressee" service.

D B Peck

Name (Print)

D B Peck

Signature

676722335US

1

永久電流スイッチとその使用方法

## 発明の背景

## 発明の分野

この発明は、磁気エネルギー貯蔵超電導磁石装置等の超電導コイルに電流を貯蔵するための永久電流スイッチ（PCS：Persistent Current Switch）として好適な、機械式永久電流スイッチ及びその使用方法に関するものである。

磁気浮上鉄道、超電導電磁推進船、医療診断用超電導装置（MRI）、エネルギー貯蔵超電導磁石装置（SMES）等では、電源から超電導コイルに導入した電流をコイル内に閉じ込めて永久電流状態を創出したり、コイル内の電流を放出したりするための永久電流スイッチ（超電導スイッチ）が使用される。

この永久電流スイッチには、大電流の安定した通電、迅速なスイッチング動作特性、エネルギー損失の軽減等といった特性が求められている。

## 背景技術

永久電流スイッチの代表的な方式としては熱式、磁界式及び機械式が挙げられるが、現在、磁気浮上鉄道や超電導電磁推進船等における超電導コイルの永久電流スイッチには主に熱式が試みられている。

しかし、熱式永久電流スイッチには、通電電流が大容量になるにつれてスイッチングの動作時間が長くなるという問題があった。

例えば、超電導線を使った10kA級の熱式永久電流スイッチの試験報告を見ると、この種のスイッチではヒータによる加熱・非加熱により常電導状態・超電導状態をコントロールしてスイッチング動作を行わせる機構が採られるため加熱・冷却に時間がかかり、オフ動作に180秒、オン動作に813秒もの時間を要するなど、動作時間が遅いといった指摘がなされている。

ただ、磁気浮上鉄道や超電導電磁推進船のような励消磁回数が極く少ない用途の場合には動作時間の遅いことに目をつむることができ、また医療診断用超電導装置等ではスイッチング動作時間が多少長かったり多少の電流ロスが生じたりしてもそれほど問題とはならないことから、熱式永久電流スイッチの研究・開発

10057819 " 012502

意欲に衰えが見られない。

しかしながら、エネルギー貯蔵超電導磁石装置等のような大容量で励消磁が繰り返される用途を考えた場合には、前述したようにスイッチング動作時間が遅い熱式永久電流スイッチは極めて不利であると考えられる。

また、熱式永久電流スイッチや磁界式永久電流スイッチには、励消磁時に永久電流スイッチへ電流分流が起きるのを完全に防ぐことができず、この電流分流によるエネルギー損失が大きいという問題点もあった。

これに対して、接点材料の接触、離間により電流のオン、オフを行う機械式永久電流スイッチの場合は、極く短時間のスイッチング動作で通電と完全な電流切断を繰り返すことができるので、励消磁が繰り返される超電導マグネット用のスイッチとして有利であると考えられる。

そして、機械式永久電流スイッチの接点材料に超電導材料を適用すれば、スイッチのオン時には電源からの電流を抵抗なく大容量で超電導マグネットへ供給することができ、またオフ時には電流をロスなく完全に断ち切ることが可能になると考えられた。

しかし、従来から機械式永久電流スイッチの開発に使用されてきた超電導材料の殆どは NbTi 等の金属系材料であって臨界温度  $T_c$  が高く、そのため液体ヘリウム（温度 4.2K）による冷却が不可欠で設備費用の高騰を招くという問題があった。

そこで、設備費用の大幅な低減が可能な液体窒素温度（77.3K）においても十分な機能を発揮する機械式永久電流スイッチの開発が待たれていた。

ところで、近年、液体窒素温度よりも高い臨界温度  $T_c$  を示す酸化物系の RE-Ba-Cu-O 超電導体（RE は希土類元素）が次々と発見されたことから、この酸化物系高温超電導体（焼結体）を接点材料として機械式永久電流スイッチを作成する試みがなされた。しかし、このような酸化物系高温超電導体（焼結体）を接点材料として試作された機械式永久電流スイッチでは接点材料の機械接触面間における電気抵抗が高くて超電導状態が得られず、実用化の目処が立たないとして研究が取り止められた経緯がある。

このようなことから、本発明が目的としたのは、オン時には電源からの電流を

大容量でロスなく超電導マグネットへ供給することができ、またオフ時には電流を完全に断ち切ることができる動作時間の短い安価な機械式永久電流スイッチを提供することである。

### 発明の要旨

本発明者等は、上記目的を達成すべく行った研究の過程で、まず“焼結法による酸化物系高温超電導体”ではなくて“熔融法によって作成されるバルク RE-Ba-Cu-O 超電導体 (RE は希土類元素)”に着目し、この熔融法によるバルク高温超電導体を機械式永久電流スイッチの接点材料として適用することの可否を調査した。なぜなら、熔融法によるバルク RE-Ba-Cu-O 超電導体は磁束ピンニング力が大きいことから高温・高磁場中でも高い臨界電流密度を有するという優れた特長を持っている上、焼結法によるものとは違って緻密度が極めて高いので接点材料の機械接触面の密着性に優れると考えられたからである。

しかしながら、単に熔融法によるバルク RE-Ba-Cu-O 超電導体を接点材料とただだけの機械式永久電流スイッチでも、焼結法による高温超電導体を接点材料としたものと同様、接点材料の機械接触面間に超電導状態を保持させることは困難であった。

そこで、本発明者等は、RE-Ba-Cu-O 超電導体から成る接点材料の機械接触面間に超電導状態を保持させ得ない原因を解明すべく更に研究を重ね、次の事項を見出した。

- a) 超電導体からなる接点材料の機械接触面間に超電導状態を保持させるためには、接点材料の接触面同士を数ナノメートル以内の間隔で密接させなければならない。そのため、表面の平滑性に劣る焼結体の場合にはこのような条件を作り出すことが難しい。しかし、緻密な熔融法によるバルク超電導体で構成された接点材料の場合には比較的平滑な表面を得ることができるので、接触面同士を加圧して接触させることによりこのような状態を作り出すことが可能である。この場合、接点材料の接触面を十分に研磨することは接触面積を増やすことにもなるので超電導状態の形成にとって一層好ましい。
- b) また、RE-Ba-Cu-O 高温超電導体では酸素が不安定であるため表面に

酸素不足の層が形成されがちであり、この酸素不足層によって機械接触面間の超電導状態が阻害されるという現象が起きる。しかしながら、熔融法によるバルク超電導体で構成された接点材料の接触面同士を加圧接触させた状態で一旦これにある臨界点以上の電流を流し、その後に永久電流スイッチとしての使用を行えば、酸素不足層によってもたらされる上記弊害を克服することができる。

以上の知見より、熔融法によるバルク RE-Ba-Cu-O 超電導体を機械式永久電流スイッチの接点材料とし、その使用に当って接点材料の接触面同士を加圧接触させた状態で一旦これにある臨界点以上の電流を流す前処理を施せば優れた性能の永久電流スイッチが得られると考えられたが、その実用化に際しては更に次に示す大きな問題があった。

即ち、熔融法によるバルク RE-Ba-Cu-O 超電導体は金属材料に比べて機械的特性が大きく劣り、そのためこれを使用した機械式永久電流スイッチの接点材料は接点部を超電導状態とするための（接触面の接触抵抗を極力減らすための）加圧力に十分耐え得ないということが明らかとなった。

加えて、バルク RE-Ba-Cu-O 超電導体の主相をなす  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  は正方晶から斜方晶への相転移による歪みの影響で ab 面に沿ってクラックが発生しやすく、この点からも上記材料から成る接点材料は機械的強度の面で満足できるものとは言えなかった。

即ち、これらのクラックはバルク体の冷却時に発生する熱応力等によって進行する。しかも、機械式永久電流スイッチの場合、スイッチ動作の度にバルク体で構成された接点材料の表面は接触を繰り返すのでその際の衝撃によって内部クラックの延伸が進行する。そして、クラックに伴う破壊はバルク体（接点材料）内部を流れる電流の妨げになるため、永久電流スイッチとしての通電容量の低下につながりかねない。

しかし、本発明者等は、熔融法によるバルク RE-Ba-Cu-O 超電導体で構成した接点材料の強度向上策として特許第 3 1 4 4 6 7 5 号や特許第 3 1 0 0 3 7 0 号の技術に係るバルク RE-Ba-Cu-O 超電導体（接点材料）への樹脂含浸の手法を試み、強度が約 2 倍も向上した接点材料（バルク RE-Ba-Cu-O 超電導

体)を得ることに成功した。そして、この樹脂含浸強化した接点材料を用いて機械式永久電流スイッチを試作し、この永久電流スイッチについて通電実験を行って永久電流スイッチとしての適合性を調べた。そして、次のことを確認した。

“樹脂含浸強化した溶融法によるバルク RE-Ba-Cu-O 超電導体”から成る接点材料を用いた機械式永久電流スイッチも、樹脂含浸なしの溶融法によるバルク RE-Ba-Cu-O 超電導体から成る接点材料を用いたものと同じく、液体窒素を充填した環境で接点材料同士を加圧接触させて電流をある程度まで流して行くと、まず当初は不安定に電圧が上がり始め、それからある電流値になると電圧が急落するが、その後は再度一定の率で電圧が上昇する現象が起きる。そして、この時点から電流を下げて行くと同じ比率で電圧が低下して行き（この領域では接点材料が発熱していると考えられる）、ある値にまで電流が下がると電圧が殆ど 0 となり、それ以降はこの範囲で超電導状態が保たれることを確認した。

また、接点材料同士の加圧荷重が大きくなると、上述した超電導状態を呈する電流値の範囲が広くなることも見出した。

本発明は、上記知見事項等に基づいてなされたものであり、次の(1)乃至(5)項に示す機械式永久電流スイッチ並びにその使用方法を提供するものである。

(1) 機械式永久電流スイッチであって、樹脂を含浸させた溶融法によるバルク RE-Ba-Cu-O 超電導体 (RE は希土類元素) を接点材料として構成される。

(2) 前記(1)項記載の機械式永久電流スイッチであって、前記含浸樹脂が線膨張係数の小さいフィラー材を分散して含有する。

(3) 前記(1)項記載の機械式永久電流スイッチであって、前記接点材料同士の接触面が研磨面である。

(4) 前記(1)項記載の機械式永久電流スイッチであって、接点材料の ab 面と垂直な面を接点材料同士の接触面とすることによって通電方向が ab 面に平行となるように設定して成る。

(5) 前記(1)項の機械式永久電流スイッチの使用方法であって、機械式永久電流スイッチの使用に先立って、一旦、接点材料の接触面同士を接触させた状態で、少なくとも“電圧降下に続く電圧上昇現象”が現れるまで電流値を増加させながら通電を行う処理を施す工程を有する。

この発明によれば、オン時には電源からの電流を大容量でロスなく超電導マグネットへ供給することができ、またオフ時には電流を完全に断ち切ることができる動作時間の短い安価な機械式永久電流スイッチの提供が可能となり、磁気エネルギー貯蔵超電導磁石装置等性能向上に大きく寄与できるなど、産業上有用な効果がもたらされる。

#### 図面の簡単な説明

図1は、実施例で作成した接点材料（バルク超電導体）の形態を示す説明図である。

図2は、実施例で作成した接点材料（バルク超電導体）に関する臨界電流密度（ $J_c$ ）測定結果を示すグラフである。

図3は、実施例で使用した通電試験装置の説明図である。

図4は、実施例で作成した接点材料（バルク超電導体）の100N荷重試験において得られた電圧（V）と電流（I）の関係を示すグラフである。

図5は、実施例で作成した接点材料（バルク超電導体）の500N荷重試験において得られた電圧（V）と電流（I）の関係を示すグラフである。

図6は、実施例で作成した接点材料（バルク超電導体）の荷重変化試験において得られた電圧（V）と電流（I）の関係を示すグラフである。

図7は、超電導磁石の等価回路図である。

#### 望ましい実施態様

本発明において、バルクRE-Ba-Cu-O超電導体（REはY, La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb等の希土類元素）とはREBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>を主相とする銅酸化物系超電導体を意味するが、強化のためにAgを含有させたものでも構わない。そして、このバルク超電導体は、焼結法ではなくて熔融法によって作成されたものとする。焼結法で作成されたRE-Ba-Cu-O超電導体では、機械式永久電流スイッチの接点材料としての所要性能を得ることができない。

熔融法によるバルクRE-Ba-Cu-O超電導体に樹脂を含浸させる方法としては、特許第3144675号に係る技術、即ち減圧雰囲気下に保持したバルク超

電導体と液状樹脂とを接触させてバルク超電導体に樹脂を含浸させる手法が適用できる。

なお、バルク超電導体に含浸させる樹脂としてはエポキシ系樹脂、尿素樹脂、フェノール樹脂、不飽和ポリエステル樹脂、ポリウレタン、アルキド樹脂、メラミン樹脂等が挙げられるが、強化機能等の点からエポキシ系樹脂が適当であると言える。

ところで、樹脂含浸したバルク超電導体から成る接点材料では、冷却時におけるバルク超電導体と樹脂との熱歪みの差によってバルク超電導体と樹脂との含浸接触面に過剰な力が働き、樹脂やバルク超電導体が損傷を受ける可能性がある。この損傷を防ぐ上では、バルク超電導体と樹脂それぞれの熱膨張率が各温度域で一致していることが望ましい。

そこで、バルク超電導体に含浸させる樹脂中に線膨張係数の小さいフィラー材を分散して含有させ、線膨張係数をバルク超電導体のそれに極力近づけた樹脂含浸層を形成させるのが良い。

このような線膨張係数の小さいフィラー材を分散して含有した含浸樹脂層をバルク超電導体に形成させる方法としては、特許第3100370号に係る技術、即ち減圧雰囲気下に保持したバルク超電導体と上記フィラー材を分散した液状樹脂とを接触させてバルク超電導体にフィラー材入りの樹脂を含浸させる手法が適用できる。

樹脂の線膨張係数を低くするために分散・含有せしめられるフィラー材としては、石英、炭酸カルシウム、アルミナ、水和アルミナ、ガラス、タルク及び焼石膏等が挙げられ、これを微粉状として用いるのが良い。

また、バルクRE-Ba-Cu-O超電導体からなる接点材料の機械接触面間に超電導状態を保持させるためには接点材料の接触面同士を数ナノメートル以内の間隔で密接させなければならないことは先に述べた通りであるが、そのためには加圧荷重を大きくすることのほかに接点材料の接触面を十分に研磨することが望ましい。また、接点材料の接触面を十分に研磨することは接触面積を大きくすることにもなるので、むしろ接点材料の接触面を十分に研磨しないと接点材料の機械接触面間に超電導状態を安定して保持させ得ないと言えるほど研磨は有効な手立て

の1つである。

更に、バルク RE-Ba-Cu-O 超電導体から成る接点材料の表面を十分に研磨したとしても接点材料の機械接触面間に超電導状態を安定して作り出せない場合のあることが認められた。そして、この理由が、機械式永久電流スイッチに適用したバルク超電導体から成る接点材料同士の方が揃っていないことによるものであると考えられた。

そこで、検討を行い、バルク RE-Ba-Cu-O 超電導体から成る接点材料の ab 面と垂直な面を接点材料同士の接触面とすることによって通電方向が ab 面に平行となるように設定すれば上記不都合を安定して回避できることが分かった。

なお、この条件に沿わない場合であっても機械式永久電流スイッチに所望される効果が得されないわけでないことは言うまでもない。

ところで、樹脂含浸した熔融法によるバルク RE-Ba-Cu-O 超電導体を接点材料として成る機械式永久電流スイッチの使用に際して重要なことは、一旦、接点材料の接触面同士を接触させた状態で少なくとも“電圧降下が続く電圧上昇現象”が現れるまで電流値増加させながら通電を行う前処理を施すことである。この前処理を施さないと、接点材料の機械接触面間に超電導状態を作り出すことができない。

この理由として次のことが考えられる。

一般に、バルク RE-Ba-Cu-O 超電導体は酸素が不安定なためその表面は化学反応により酸素の低い超電導特性を失った極く薄い絶縁層が形成されている。しかるに、バルク超電導体同士を接触させて電流を流すと、当初は前記絶縁層のために接触面間で円滑な電流の流れが生じずに高い電圧値や不安定な電圧挙動を示すが、電流値を増加させて行くと電流増加の間にこの絶縁層が破られてバルク超電導体の接触面間に超電導状態を作り出す条件が整うこととなる。

そして、前記絶縁層が破られてバルク超電導体の接触面間に超電導状態を作り出す条件が整ったことは、電圧が急降下し、それから安定した電圧状態となる現象によって確認することができる。

続いて、本発明を実施例により更に具体的に説明する。



### 実施例

まず、溶融法によって 10wt% の Ag を添加したバルク Y-Ba-Cu-O 超電導材料を作成した。形状は、図 1 に示したように一辺が約 10 mm の立方体とした。

次に、このバルク体に、図 1 に示した如く電流端子と電圧端子をそれぞれ超音波ハンダにより接合し、機械式永久電流スイッチの接点材料とした。

なお、この際、バルク体のスイッチ接触面が ab 面と垂直に、通電方向が ab 面と平行となるように接点材料を作成した。

次いで、この状態の接点材料（バルク超電導体）に対して樹脂含浸強化処理を行った。

まず、含浸用樹脂は、主剤としてビスフェノール A 型エポキシ樹脂を、硬化剤として芳香族ポリアミンを使用した。また、樹脂の熱膨張率を接点材料（バルク超電導体）のそれに近づけるため、石英粉も配合した（樹脂と石英粉の重量配合比 100 : 90）。そして、それぞれ 30℃ まで予熱した状態で配合組成 100 : 32（重量比）で混合して真空下で脱気を行った。

次に、電極端子（電流端子と電圧端子）のついた接点材料（バルク超電導体）を 70℃ まで予熱してから石英粉配合の樹脂と硬化剤を付着させ、真空槽の中でまず減圧して保持した後、大気圧以上に加圧した。続いて、80℃ において 6 時間、120℃ において 2 時間加熱した。その際、実験装置にそのまま組み込めるよう、円柱形状となるよう樹脂を型に嵌め硬化処理を行った。

上記のように作成した永久電流スイッチの実験に供する接点材料（バルク超電導体）の一部を切り出し、臨界電流密度（ $J_c$ ）を測定した。

なお、切り出し寸法は 1.31mm×1.33mm×0.21mm で、磁場の印加方向は c 軸に平行とした。そして、試料の直流帯磁率を SQUID 磁束計を用いて測定し、超電導体の磁化ヒステリシス曲線を基に臨界状態を Bean モデルによって仮定し、試料の  $J_c$  を求めた。

この臨界電流密度（ $J_c$ ）の測定結果を図 2 に示す。

図 2 から明らかなように、得られた接点材料（バルク超電導体）の臨界電流密度（ $J_c$ ）は「77K at 0 T」の条件で 57,667 A/cm<sup>2</sup> であった。また、「77K at 0.5 T」の条件では 25,767 A/cm<sup>2</sup>、「77K at 1 T」の条件では 18,992 A/cm<sup>2</sup> と、

磁場下においても高い臨界電流密度 ( $J_c$ ) を示した。

従って、永久電流スイッチが磁場にさらされる環境下に設置されても、高い臨界電流密度 ( $J_c$ ) を保持し十分な通電容量を得ることができると言える。

ここで、臨界電流密度 ( $J_c$ ) を測定した際の磁場の印加方向は  $c$  軸に平行なためにその値は多少低めの数値となっているが、実際に永久電流スイッチを電導磁石 (クライオスタット) に取付ける場合には接点材料 (バルク超電導体) は  $ab$  面方向に平行となるように設置する。これにより、積層欠陥が有効なピンニングセンターとして作用するため、高磁場になるほどより高い臨界電流密度 ( $J_c$ ) を得ることができる。

次いで、作成した前記接点材料 (バルク超電導体) につき、図 3 に示す通電実験装置を用いた次の手順の通電試験を行った。

2つの (一对の) 樹脂含浸強化された接点材料 (バルク超電導体) を、接点材料同士が密着するように固定し、荷重コントローラによって接触荷重を一定荷重となるよう制御する。

装置全体を液体窒素によって浸漬冷却し、バルクが十分冷却された後に通電する。通電電流は  $10\text{ A} \sim 20\text{ A}$  までとし、一对の上部のバルク体を陽極、下部を陰極とする。それぞれのバルク間の電圧を四端子法によって測定する。

なお、サンプルは、接触面を表面研磨していない荒削りの接点材料 (バルク超電導体) と、その後に同サンプルを表面研磨したもののそれぞれとした。

また、試験は、 $100\text{ N}$  荷重試験、 $500\text{ N}$  荷重試験、荷重変化試験の3項目とし、 $100\text{ N}$  荷重試験では、研磨なしの接点材料 (バルク超電導体) に  $100\text{ N}$  の荷重を与えた状態で電流値を  $0\text{ A} \rightarrow 10\text{ A} \rightarrow 0\text{ A}$  と変化させ、この過程を5回繰り返した。

$500\text{ N}$  荷重試験では、研磨した接点材料 (バルク超電導体) に  $500\text{ N}$  の荷重を与えた状態で、電流値を  $0\text{ A} \rightarrow 14\text{ A} \rightarrow 0\text{ A}$  と変化させ、この過程を3回繰り返した。

そして、荷重変化試験では、研磨した接点材料 (バルク超電導体) にそれぞれ  $100\text{ N}$ ,  $300\text{ N}$ ,  $500\text{ N}$ ,  $700\text{ N}$ ,  $900\text{ N}$  の荷重を加え、その際のそれぞれの電流値を  $0\text{ A} \rightarrow 10\text{ A}$  と変化させた。

まず、100N荷重試験において得られた電圧（V）と電流（I）の関係（V－I特性）を図4に示す。図4は次のことを示している。

初回の電流値増加（行き）の際、電圧は比較的高い値を示している。電圧値は電流値の増加と共に上昇し、3Aをピークに緩やかに低下し始め、7Aを過ぎたところで急激に降下する。その後7.5Aから電流値の増加と共に上昇する。

初回の電流値減少（戻り）の際には電圧値はほぼ直線的に降下して3.5Aで1mΩと極く小さな抵抗値を示し、超電導特有の電圧降下の現象が見られる。

2回目以降は、行きと戻りの何れにおいても、初回の戻りと同様の経路をたどっている。

次に、500N荷重試験におけるV－I特性を図5に示す。図5は次のことを示している。

初回の行きの電圧値は9Aでピークを示し、12Aで比較的低い値に落ちつき、その後はほぼ直線的に増加している。

初回の戻りの際は、電圧値はほぼ直線的に降下し6Aで0.3mΩと極く小さな抵抗値を示しており、100N荷重試験結果と同様に電圧降下現象がみられる。

2回目以降は、何れも、戻りは初回の戻りと同様の経路をたどっているが、行きは何れも13.5Aを過ぎたところで急激に上昇している。

次に、0Aで液体窒素内で接点材料（バルク超電導体）の接触面を離し、再度接地させ500Nの荷重を加えたところ、初回目、2回目以降と、前試験とほぼ同様の結果を得た。

荷重変化試験におけるそれぞれのV－I特性を図6に示す。図6は次のことを示している。

荷重100Nの電圧は常に高い値を示している。また、その電圧値は不安定で電流値の変化に追従せず、計測中も決まった値を示さなかった。

100Nから700Nまで荷重が増すごとにそれぞれの電圧値は減少しているが、700Nと900Nの荷重ではそれぞれ各電流値における電圧値はほぼ一致している。接点材料（バルク超電導体）の接触面に加える荷重をある値まで増やして行くことによって接触抵抗を減少させることが可能である。

以上の通電試験結果から、次のことが分かる。

何れの試験結果においても、初回の通電において比較的高い電圧値を示している。

500 N荷重試験の初回通電では、電流値の増加と共に電圧値は上昇し、9 Aをピークに降下し、12.5 Aから再度電流値の増加と共に上昇している。9 Aから12.5 Aの降下は特に不安定な動きをしている。

100 N荷重試験結果も同様であるが、500 N荷重試験の結果の方がその傾向は顕著に表れている。荷重変化試験からはその傾向は殆ど見られず、随時高い電圧値と不安定な挙動を示している。

500 N荷重試験の結果と荷重変化試験の荷重500 Nの結果は同じ接点材料（バルク超電導体）でありながら、初回以降、前者は電圧降下現象（ $0.3\text{ m}\Omega$ という小さな抵抗値）を示し、後者は示していない。荷重変化試験では通電電流を最大10 Aとしたため、不安定な動きををすると思われる9 Aから12.5 Aの領域に至っていない。

先にも述べたように、一般にバルク RE-Ba-Cu-O 超電導体では酸素が不安定で、その表面は化学反応により超電導特性を失った極く薄い絶縁層が形成されている。上記試験結果からは、電流増加の間にこの絶縁層が破られ、このような高い電圧値や不安定な挙動として表れたものと考えられる。

また、バルク超電導体は酸化物であるため金属接点のような溶着が起きにくくて通電状態の変化はそれほど生じないと考えられたが、一定の電流量を超えることによって電圧が安定化する現象が生じている。

絶縁層を破る現象の原因の一つとして、放電現象が考えられる。

アーク放電は持続放電であり、放電形態としても最終の段階にある。即ち、初期のグロー放電状態であっても放電電流を十分大きくして行けば遂にはアーク放電に移行する。

アーク放電は、各種放電形態のうち最も電流密度が大きく放電電圧が低いものである。例えば、500 N荷重試験の初回の通電において、電流の増加と共に電圧が上がる領域はグロー放電が発生していると考えられる。グロー放電はアーク放電に比べて電流密度が小さいことから電圧値は高くなる。

電圧が降下し不安定に推移する領域は過渡状態で、グロー放電からアーク放電

に移行している不安定な状態と考えられる。また、アークの柱内温度は5000 K～7000 Kであるが、それでも液体窒素への浸漬冷却によって接点材料（バルク超電導体）は臨界温度 $T_c$ 以下の超電導状態を保持すると考えられる。

500 N荷重試験の結果において、2回目以降で行きと戻りの経路が異なっているのは、接点材料（バルク超電導体）の温度上昇が原因と思われる。

即ち、行きの通電電流13.5 Aまでは温度、電流値ともに超電導の臨界温度 $T_c$ 及び臨界電流値 $I_c$ 以下を示しているが、13.5 Aを過ぎたところで $T_c$ 又は $I_c$ を超えて常電導状態に転移し、接点材料（バルク超電導体）内にジュール熱が発生する。そして、戻りの際、通電電流を下げていくに従って発熱量は低下し、6 Aの時点で $T_c$ 及び $I_c$ 以下になって電圧降下現象が生じるものと考えられる。

ところで、接触面積と接触抵抗の関係はHolmの集中抵抗の式より下記(1)式として表すことができる。

$$\text{接触抵抗} \quad R_c = \frac{\rho}{2} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{S_c}} \dots \dots \dots (1)$$

$$\left( \begin{array}{l} S_c : \text{接触面積} \\ \rho : \text{超電導体の抵抗率} \end{array} \right)$$

100 N荷重試験において、電圧降下で「1 mΩ at 3.5 A」を示したのに対して、500 N荷重試験においては「0.3 mΩ at 13.5 A」を示したが、これは接触面を研磨して接触面積を増やしたために接触面の臨界電流値も増加したものと考えられる。

前記(1)式より、今回の研磨によって接触面積は約9倍に増加したことが分かる。

なお、この試験では接点材料（バルク超電導体）の研磨は比較的簡素化した方法で行ったが、研磨の精密化により更なる低抵抗化が期待できる。

また、荷重変化試験の結果は、接触面の荷重を増やすことによって接触面積を増やすことも可能であることを示している。しかし、その反面、同じ電流量であれば単位面積当りのエネルギーは小さくなるので、初回の通電において絶縁層を

破るためには更なる大きな通電電流を必要とすると言える。

次に、試験結果を基に永久電流磁石のエネルギー損失を算出し実用レベルの検討を行った。

まず、図 7 に示した等価回路より、熱式又は磁界式永久電流スイッチの励消磁モード時の損失  $E_{ex}$  は次式で示される。

$$E_{ex} = \frac{(LJ_0)^2}{R_{off}} \left[ T_1 - \frac{L}{R_{off}} \left\{ \frac{1}{2} \exp\left(-2 \frac{R_{off}}{L} T_1\right) - 2 \exp\left(-\frac{R_{off}}{L} T_1\right) + \frac{3}{2} \right\} \right] \quad [\text{J}] \cdots (2)$$

$$\begin{pmatrix} L & : & \text{インダクタンス} \\ J_0 & : & \text{励磁電流} \\ R_{off} & : & \text{PCS オフ時抵抗} \\ T_1 & : & \text{励磁の時間} \end{pmatrix}$$

また、機械式永久電流スイッチの永久電流モード時の損失  $E_{st}$  は次式で示される。

$$E_{st} = \frac{1}{2} L I_0^2 \left\{ 1 - \exp\left(-2 \frac{R_{on}}{L} T_2\right) \right\} \quad [\text{J}] \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$\begin{pmatrix} L & : & \text{インダクタンス} \\ I_0 & : & \text{定格電流} \\ R_{on} & : & \text{PCS オン時抵抗} \\ T_2 & : & \text{時間} \end{pmatrix}$$

計算条件として、熱式又は磁界式の永久電流モード時と機械式の励消磁モード時の損失はないと考え、熱式、磁界式のオフ抵抗値は  $6 \Omega$  とし、励消磁モード及び永久電流モードの時間はそれぞれ 6 時間とした。

その結果、大規模クラスの磁気エネルギー貯蔵超電導磁石（貯蔵量  $10 \text{ GWh}$ 、定格電流  $500 \text{ kA}$ 、インダクタンス  $288 \text{ H}$ ）の場合、熱式又は磁界式永久電流スイッチの励消磁モード時の損失は  $160 \text{ MJ}$  であった。これは、機械式永久電流スイッチのオン抵抗値 ( $0.12 \text{ m}\Omega$ ) の場合の永久電流モード時の損失に相当する。

これに対して、本実施例での本発明例に係る機械式永久電流スイッチでのオン抵抗は  $0.3\text{m}\Omega$  であり、非常に近い値であり、研磨の精密化、接触面形状の検討や荷重量の最適化を行うことによりこの計算結果を十分下回ることができる値と言える。

10057819.012502

## 特許請求の範囲

1. 機械式永久電流スイッチであって、樹脂を含浸させた溶融法によるバルク R E - Ba - Cu - O 超電導体 (R E は希土類元素) を接点材料を具備する。
2. 請求項 1 記載の機械式永久電流スイッチであって、前記含浸された樹脂には、線膨張係数の小さいフィラー材が分散して含有されている。
3. 請求項 1 記載の機械式永久電流スイッチであって、前記接点材料同士の接触面が研磨面である。
4. 請求項 1 記載の機械式永久電流スイッチであって、接点材料の ab 面と垂直な面を接点材料同士の接触面とすることによって通電方向が ab 面に平行となるように設定して成る。
5. 請求項 1 の機械式永久電流スイッチの使用方法であって、機械式永久電流スイッチの使用に先立って、一旦、接点材料の接触面同士を接触させた状態で、少なくとも“電圧降下に続く電圧上昇現象”が現れるまで電流値を増加させながら通電を行う処理を施す工程を有する。

10057819.012502



## 要 約 書

本発明の機械式永久電流スイッチでは、機械式永久電流スイッチの接点材料を、樹脂を含浸させた“溶融法によるバルク RE-Ba-Cu-O 超電導体 (RE は希土類元素)”で構成する。樹脂中に線膨張係数の小さいフィラー材を分散させること、あるいは、接点材料同士の接触面を研磨面とすること、あるいは接点材料の ab 面と垂直な面を接点材料同士の接触面とすることによって、通電方向が ab 面に平行となるように設定する。使用に当っては、一旦、接点材料の接触面同士を接触させた状態で、少なくとも電圧降下に続く電圧上昇現象が現れるまで電流値増加させながら通電を行う前処理を施す。これにより、動作が迅速で電流をロスなく大容量で超電導マグネットへ供給することができる比較的安価な機械式永久電流スイッチを提供する。

20527819-012502